

引用本文:何化南,代向阳.基于毛细管负压理论的纤维混凝土早期水平收缩试验[J].建筑科学与工程学报,2020,37(3):83-80.

HE Hua-nan, DAI Xiang-yang. Experiment on Early Horizontal Shrinkage of Fiber Reinforced Concrete Based on Negative Capillary Pressure Theory[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(3): 73-80.

DOI:10.19815/j.jace.2019.01012

基于毛细管负压理论的纤维混凝土早期水平收缩试验

何化南,代向阳

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室,辽宁 大连 116024)

摘要:为了研究聚丙烯纤维不同参数对混凝土早期水平收缩的影响,基于毛细管负压理论,进行了水平收缩试验。分别采用水势张力计及万用表测试了混凝土内部早期毛细管负压及电阻的发展,得到了混凝土早期毛细管负压及电阻发展的全过程曲线,将毛细管负压和电阻发展曲线结合在一起,得到混凝土早期毛细管负压的空气进入值 P_{aev} ,并探索了纤维不同参数与 P_{aev} 之间的关系,给出了综合考虑纤维体积率和纤维长度的参数 G 与 P_{aev} 之间关系的表达式;另外,利用高精度激光位移传感器测试了混凝土早期的水平收缩变形发展过程。结果表明:聚丙烯纤维加入混凝土后有效地减缓了混凝土内部早期毛细管负压的发展速率,并显著降低了毛细管负压的极限值,从而抑制了混凝土早期的水平收缩变形,同时提高了混凝土早期毛细管负压的 P_{aev} 值,即提高了混凝土早期的抗裂强度;当纤维体积率为 0.1%,纤维长度为 18 mm 时,混凝土早期毛细管负压的空气进入值 P_{aev} 达到 41.1 kPa,抵抗局部开裂的能力最强,同时早期水平收缩变形得到较好地抑制,水平收缩最大值相比素混凝土降低 72.6%。

关键词:纤维混凝土;空气进入值;早期水平收缩;毛细管负压理论;激光测距;局部开裂

中图分类号:TU528.572

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)03-0073-08

Experiment on Early Horizontal Shrinkage of Fiber Reinforced Concrete Based on Negative Capillary Pressure Theory

HE Hua-nan, DAI Xiang-yang

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology,
Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: In order to research the influences of different parameters of polypropylene fiber on early stage horizontal shrinkage of concrete, based on negative capillary pressure theory, the horizontal shrinkage tests were carried out. The developments of both negative capillary pressure and electric resistance in the early stage of concrete were measured by water potential tensiometer as well as multimeter respectively, and the whole process curve of the development of negative capillary pressure and electric resistance in the early stage of concrete was obtained. By combining the development curves of negative capillary pressure and electric resistance, the air-entry value

收稿日期:2019-07-19

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2015CB057703)

作者简介:何化南(1972-),女,黑龙江哈尔滨人,副教授,工学博士,E-mail:hehuanandl@163.com。

通信作者:代向阳(1993-),男,河南驻马店人,工学硕士研究生,E-mail:daixiangyang0328@163.com。

P_{aev} of negative capillary pressure was obtained. Meanwhile, the relationship between different parameters of polypropylene fiber and P_{aev} was discussed and a comprehensive formula to express the relationship between parameter G and P_{aev} was given. Parameter G synthesized fiber volume fraction and fiber length and P_{aev} . In addition, the development process of early horizontal shrinkage deformation of concrete was tested by high-precision laser displacement sensor. The results show that the adding of polypropylene fiber into concrete can effectively slow down the early development rate of negative capillary pressure in concrete and significantly reduce the limit value of negative capillary pressure, thereby inhibiting the early horizontal shrinkage deformation of concrete. Meanwhile, the P_{aev} value of negative capillary pressure in the early stage of concrete is increased, which improves the early cracking resistance strength of concrete. When the fiber volume fraction is 0.1% and the fiber length is 18 mm, the P_{aev} value of the negative capillary pressure of the concrete reaches 41.1 kPa, which has the strongest early resistance to local cracking of concrete. At the same time, the early horizontal shrinkage deformation of concrete is well controlled, and the maximum horizontal shrinkage is 72.6% lower than that of plain concrete.

Key words: fiber reinforced concrete; air-entry value; early horizontal shrinkage; negative capillary pressure theory; laser ranging; local cracking

0 引言

新浇筑的混凝土梁、楼板、桥面板等构件在高温、大风、干燥等恶劣环境下,极易产生塑性收缩裂缝,这主要是因为混凝土内部毛细管负压的发展而引起的混凝土塑性收缩开裂^[1-2]。在酷热干燥的环境中,由于混凝土表面的水分蒸发速率大于其内部的泌水速率,这种差异在混凝土内部产生了毛细管负压,水分蒸发过快引起毛细孔弯液面曲率半径越来越小,造成毛细管负压越来越大,在混凝土表面产生了较大的收缩力,引起材料早期塑性收缩^[3-6]。由于混凝土早期处于弹塑性状态,当混凝土的自由收缩遇到钢筋等阻碍时,在混凝土内部产生拉应力,当其拉应力大于混凝土早期本身的抗拉强度时,便易形成早期塑性裂缝,这样就为腐蚀性介质进入混凝土内部提供了渗透和迁移的通道,加速了外部环境对混凝土内部的侵蚀,严重影响了混凝土结构的耐久性^[2,7-14]。Wittmann^[15]通过试验研究发现,随着毛细管负压的发展,混凝土的塑性收缩也开始发展,当毛细管负压达到最大值时,塑性收缩也不再发展。Slowik 等^[6]对混凝土塑性阶段的毛细管负压进行了较为系统的研究,发现当毛细管负压达到某一特定值时,空气开始在局部进入毛细孔,此时混凝土出现第 1 条微裂缝,这个过程称为“air-entry”,即“空气进入”,相对应的毛细管负压值称为“air-entry value”,即“空气进入值”;随后毛细孔中的水重新分

布,混凝土内部的毛细管负压继续增大,当混凝土出现多处裂缝时,毛细孔中的水不能够继续维持平衡,毛细管负压达到最大值并逐渐减小至 0,此时毛细管负压的空气进入值可作为早期塑性收缩开裂风险的指标,对于研究混凝土早期塑性收缩开裂有着重要的意义。钱觉时等^[16]提出电阻率可以用于表征混凝土早期开裂,通过实时监测混凝土的电阻发展过程,若某一时刻混凝土的电阻突然增大,就有可能出现了局部开裂的情况,这种变化规律对于不同配合比或原材料的混凝土都是相似的。洪天从等^[17]通过试验研究同样指出,早期混凝土界面过渡区出现微裂缝会导致混凝土电阻增大。本文借鉴 Slowik 等^[6,16]学者的思路,将毛细管负压和电阻测量结合在一起,采用工程中常用的聚丙烯纤维作为早期收缩阻裂材料,进行了纤维混凝土早期毛细管负压、电阻以及水平收缩等试验,研究了纤维体积率、纤维长度等参数对混凝土内部早期毛细管负压的空气进入值以及水平收缩的影响,进而分析纤维对混凝土早期塑性收缩的作用机理,为进一步研究提供一定的科学指导。

1 试验概况

1.1 原材料及配合比

粗骨料为 5~10 mm 粒径且级配良好的石灰石碎石,细骨料为河沙中砂,水泥采用大连市小野田水泥厂生产的 P.O42.5R 普通硅酸盐水泥,纤维为常

州市天怡工程纤维有限公司及江苏博特新材料有限公司生产的聚丙烯纤维,弹性模量为 6.5 GPa,抗拉强度为 630 MPa。所有混凝土基体的配合比见表 1。

表 1 混凝土配合比
Tab. 1 Mix Proportion of Concrete

各材料用量/(kg·m ⁻³)				水灰比
水泥	水	石子	砂	
446	268	1 102	593	0.6

1.2 试验分组

为更好地研究纤维体积率、纤维长度对混凝土早期毛细管负压发展及水平收缩的影响,试验研究分为 10 组,如表 2 所示,表中编号 ρ_f, l_f 分别为纤维体积率、纤维长度,字母后面的数字代表数量。

表 2 试验分组
Tab. 2 Test Groups

试验分组编号	纤维体积率/%	纤维长度/mm	纤维直径/ μm
$\rho_f\text{-}0\%$	0.000	0	0
$\rho_f\text{-}0.033\%$	0.033	18	20
$\rho_f\text{-}0.067\%$	0.067	18	20
$\rho_f\text{-}0.1\%$	0.100	18	20
$\rho_f\text{-}0.133\%$	0.133	18	20
$\rho_f\text{-}0.167\%$	0.167	18	20
$l_f\text{-}6$	0.100	6	20
$l_f\text{-}10$	0.100	10	20
$l_f\text{-}30$	0.100	30	20
$l_f\text{-}40$	0.100	40	20

1.3 试验方法

1.3.1 混凝土内部毛细管负压测试方法

毛细管负压测试原理是基于毛细管中水势的不平衡及再平衡过程中毛细管负压的变化来测量的^[6,12,18]。测试系统包括陶土头、聚碳酸酯管、压力传感器、四通道变送器以及数据采集系统 IMC。陶土头和聚碳酸酯管连接为整体,把无空气水灌入聚碳酸酯管及陶土头至充满,埋入新搅拌好的混凝土试件内部距外表面 8 cm 处,且振捣密实,在测试中就可以根据连接陶土头的压力传感器得到混凝土内部的毛细管负压值。

1.3.2 混凝土早期电阻测试方法

混凝土早期电阻测试和毛细管负压测试在同一试件中进行,在试件两端各放置 1 片电极片并外接导线,利用台式万用表测量混凝土试件的电阻,然后通过数据采集软件将测得的电阻值传输到计算机。当空气渗透进混凝土后,颗粒在某些位置仅由水套相互连接,导电性明显低于水饱和阶段,通过电阻的突变,再结合毛细管负压发展曲线,就可以得到毛细

管负压 P_{aev} 值。毛细管负压与电阻测试装置示意图见图 1。

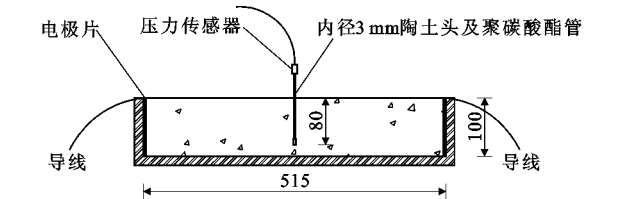


图 1 毛细管负压与电阻测试装置示意图(单位:mm)
Fig. 1 Schematic Diagram of Negative Capillary Pressure and Electric Resistance Test Device (Unit:mm)

1.3.3 混凝土早期水平收缩测试方法

根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009),混凝土早期水平收缩的测试方法采用非接触法,原理为激光测距,所用仪器为高精度激光位移传感器、电源箱、数据采集系统 IMC 以及计算机。本方法采用尺寸为 100 mm×100 mm×515 mm 的棱柱体试件,实验室内温度为 20℃±3℃,相对湿度为 60%±5%,同时在试件侧面放置大功率电风扇,使混凝土表面风速达到 5.5 m·s⁻¹,加速混凝土表面的水分蒸发及早期塑性收缩。非接触法混凝土收缩测定原理示意图如图 2 所示。

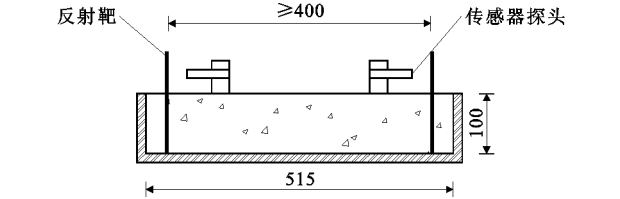


图 2 非接触法混凝土收缩测定原理示意图(单位:mm)
Fig. 2 Schematic Diagram of Concrete Shrinkage Measurement Principle by Non-contact Method (Unit:mm)

2 试验结果分析

2.1 毛细管负压理论及其发展曲线分析

毛细管负压的产生是由于混凝土毛细孔中水分的蒸发速率和泌水速率之差引起的,当水分蒸发速率大于泌水速率时,会在混凝土内部引起毛细管负压,且两者之差越大,毛细管负压发展越快^[6],毛细管负压发展曲线及塑性收缩过程如图 3 所示。

新拌混凝土浇筑完毕时,混凝土中的颗粒由于重力作用趋于下沉,混凝土中的自由水向上运动,造成了泌水(图 3 中 A 阶段)。当混凝土表面的水分蒸发速率大于其内部的泌水速率时,在混凝土表面

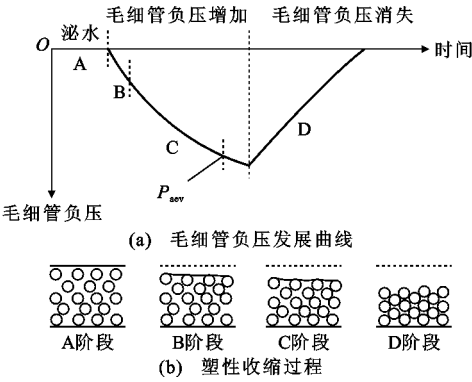


图3 混凝土内部毛细管负压发展曲线及塑性收缩

Fig. 3 Negative Capillary Pressure Development Curve and Plastic Shrinkage of Concrete

出现弯月面,水分的过快蒸发引起毛细孔弯月面曲率半径越来越小,造成了混凝土内部毛细管负压的较快发展(图3中B阶段)。毛细管负压的出现引起混凝土内部颗粒趋于紧密,导致混凝土产生塑性收缩,且随着毛细管负压的越来越大,混凝土的塑性收缩也越来越大(图3中C阶段)。当混凝土的自由收缩遇到粗骨料等阻碍时,极易造成开裂,空气便通过裂缝进入混凝土内部,然后混凝土内部毛细孔中的水重新平衡,毛细管负压继续增大,随着裂缝的开展,空气越来越多地进入到混凝土内部,毛细管负压达到最大值,之后开始逐渐减小至0(图3中D阶段)。

2.2 混凝土早期毛细管负压与电阻及水平收缩曲线分析

以素混凝土为例,进行混凝土早期毛细管负压与电阻及水平收缩曲线分析,毛细管负压与电阻发展曲线见图4(a),毛细管负压与水平收缩发展曲线见图4(b)。

从图4(a)可以看出,素混凝土早期的毛细管负压发展曲线与理论曲线相一致,在试验开始的前30 min,混凝土主要发生早期塑性沉降和泌水,然后随着混凝土表面的水分蒸发速率大于其内部的泌水速率,混凝土内部的毛细管负压得到快速发展,在200 min左右时达到最大值-66.47 kPa,之后逐渐减小至0。另外,混凝土的电阻亦随时间逐渐变大,在130 min左右时电阻出现突增,说明混凝土内部出现局部开裂,此时对应的毛细管负压值可认为是空气进入值,即 $P_{aev} = -33.14$ kPa。

从图4(b)可以看出,素混凝土早期的水平收缩随着其内部毛细管负压的增大而迅速增大,当毛细管负压达到最大值时,混凝土早期水平收缩变形达

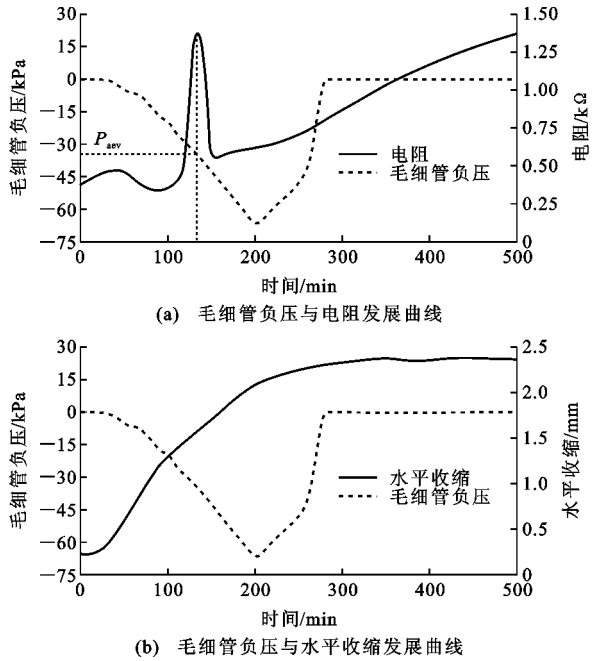


图4 素混凝土毛细管负压、电阻及水平收缩发展曲线
Fig. 4 Negative Capillary Pressure, Electric Resistance and Horizontal Shrinkage Development Curves of Plain Concrete

到2 mm左右,之后毛细管负压逐渐减小。混凝土早期水平收缩并没有停止,而是以较小速率缓慢增加,当毛细管负压最终减小至0后,混凝土早期水平收缩变形达到2.4 mm左右,然后趋于稳定。

2.3 纤维对混凝土早期毛细管负压 P_{aev} 的影响分析

不同纤维体积率混凝土早期毛细管负压与电阻发展曲线见图5,不同纤维长度混凝土早期毛细管负压与电阻发展曲线见图6。

从图4和图5可以看出,纤维掺入混凝土有效减缓了其内部毛细管负压的发展速率,并显著降低了毛细管负压的极限值,尤其当纤维体积率为0.133%时,毛细管负压的极限值明显低于素混凝土,达到-52.1 kPa,但当纤维体积率超过0.133%时,纤维在搅拌过程中容易结团,不能在混凝土内部均匀分布,阻碍了混凝土内部水分向上泌出,降低了混凝土的泌水速率,导致毛细管负压极限值变大。结合混凝土的电阻发展曲线可以看出,素混凝土早期内部出现局部开裂的时间在130 min左右,掺入纤维后混凝土早期内部出现局部开裂的时间集中在150~170 min,可见纤维掺入混凝土延缓了混凝土早期内部发生局部开裂;同时随着纤维体积率的增加,混凝土早期内部毛细管负压的 P_{aev} 值先增大后减小且均高于素混凝土,尤其当纤维体积率为0.067%~0.1%时, P_{aev} 值达到40 kPa,明显高于素混凝土的34.8 kPa,也间接地表明,纤维能够延缓

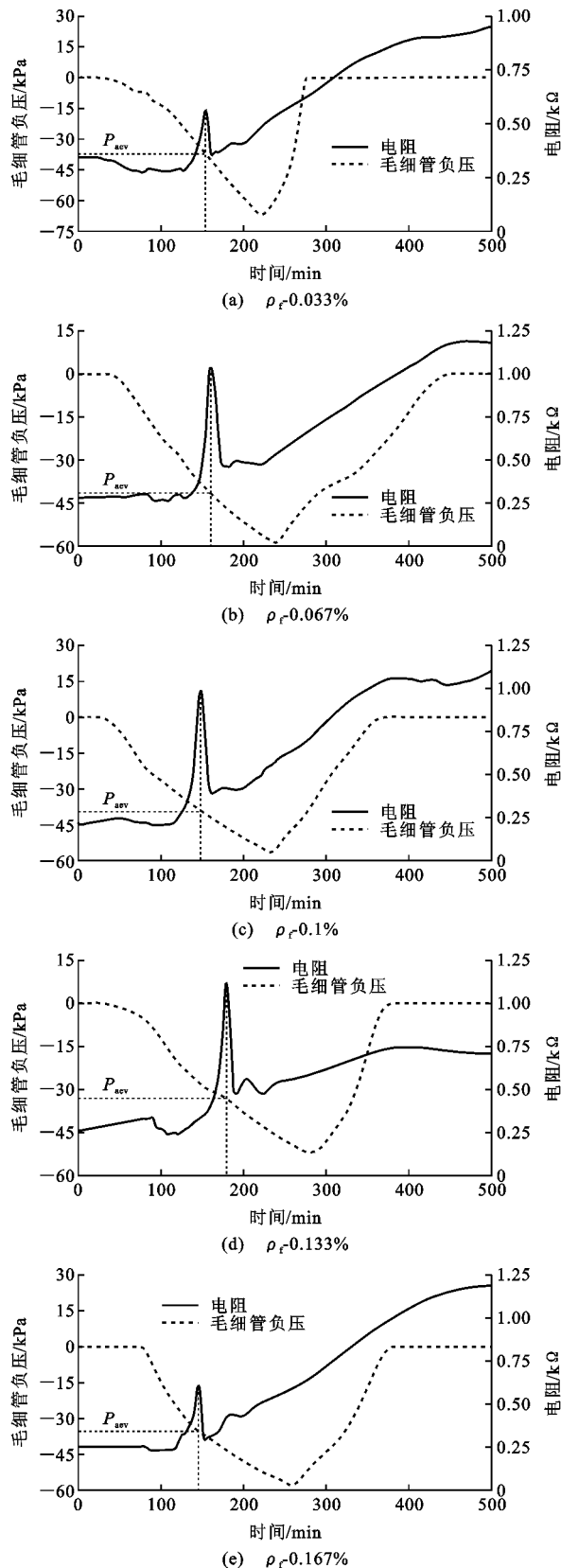


图 5 不同纤维体积率混凝土毛细管负压与电阻发展曲线
Fig. 5 Negative Capillary Pressure and Electric Resistance Development Curves of Concrete with Different Fiber Volume Fraction

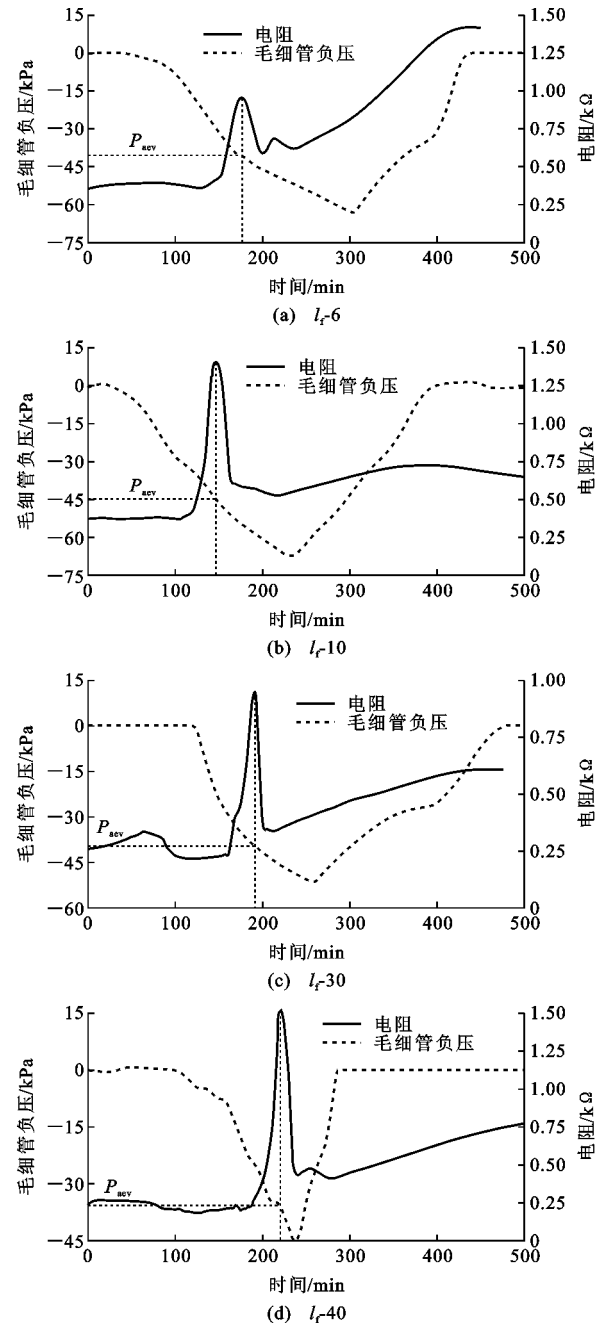


图 6 不同纤维长度混凝土毛细管负压与电阻发展曲线
Fig. 6 Negative Capillary Pressure and Electric Resistance Development Curves of Concrete with Different Fiber Length

混凝土内部局部开裂的时间。同时从图 4(a)、图 5(c)和图 6 可以看出,在纤维体积率和纤维直径一定时,随着纤维长度增大,混凝土早期内部毛细管负压的发展速率及极限值整体上均呈现出逐渐降低的趋势,混凝土早期发生局部开裂的时间相比素混凝土整体上延迟了,毛细管负压的 P_{acy} 值呈现出先增大后减小的趋势,在纤维长度为 10~18 mm 时, P_{acy} 达到 41 kPa 左右,高于素混凝土的 34.8 kPa。

综上所述,当纤维体积率为 0.067%~0.1%,纤维长度为 10~30 mm 时,纤维能够均匀地分散在混凝土中,其混凝土内部毛细管负压的 P_{aev} 值达到 40 kPa 左右,相比于素混凝土提高较大,此时聚丙烯纤维显著地提高了混凝土抵抗局部开裂的能力,即提高了混凝土早期的抗裂强度。

2.4 纤维参数与毛细管负压 P_{aev} 的关系

2.4.1 纤维体积率和长度与毛细管负压 P_{aev} 的关系

纤维体积率、纤维长度与毛细管负压 P_{aev} 的对应关系见表 3,不同纤维参数与毛细管负压 P_{aev} 的关系见图 7。

从图 7 可以看出,随着纤维体积率、纤维长度的
表 3 纤维参数与毛细管负压 P_{aev}

Tab. 3 Fiber Parameters and Negative Capillary
Pressure P_{aev}

试验分组编号	纤维体积率/%	纤维长度/mm	P_{aev} /kPa
ρ_f -0%	0.000	0	34.8
ρ_f -0.033%	0.033	18	37.5
ρ_f -0.067%	0.067	18	41.3
ρ_f -0.1%	0.100	18	39.8
ρ_f -0.133%	0.133	18	33.7
ρ_f -0.167%	0.167	18	34.5
l_f -6	0.100	6	40.2
l_f -10	0.100	10	41.3
l_f -30	0.100	30	39.5
l_f -40	0.100	40	35.6

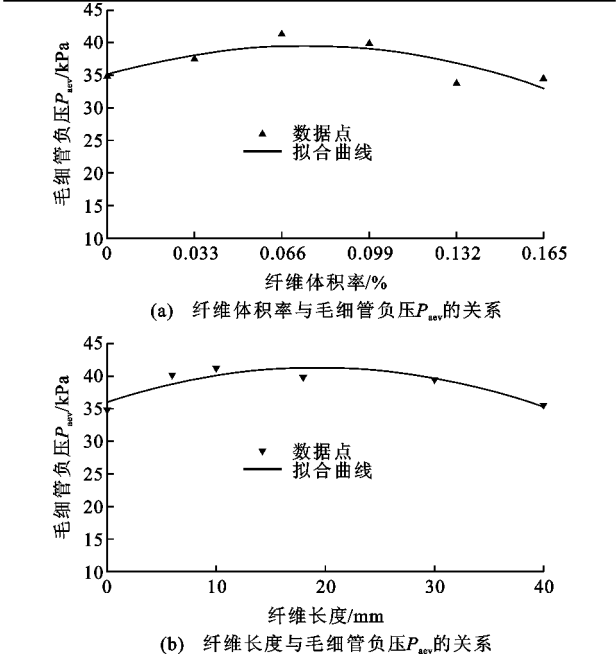


图 7 不同纤维参数与毛细管负压 P_{aev} 数据拟合曲线
Fig. 7 Fitting Curves of Different Fiber Parameters and
Negative Capillary Pressure P_{aev}

增大,其混凝土内部早期毛细管负压的 P_{aev} 值均呈现出先增大后减小的趋势,可见纤维体积率、纤维长度存在最优值,与毛细管负压的 P_{aev} 值可认为具有二次函数关系,故采用二次多项式对数据进行拟合。将与纤维体积率 ρ_f 和纤维长度 l_f 对应的 P_{aev} 分别记为 $P_{\text{aev}}(\rho_f)$ 和 $P_{\text{aev}}(l_f)$,拟合曲线分别见图 7(a), (b),拟合函数表达式分别见公式(1)和公式(2),判定系数分别为 $R^2=0.65$ 和 $R^2=0.79$,根据回归计算可得到纤维体积率和纤维长度的最优值分别为 0.076%和 19.34 mm,此时混凝土内部毛细管负压的 P_{aev} 值最大,聚丙烯纤维对混凝土早期的抗裂强度提高效果最佳,混凝土抵抗早期局部开裂的能力最强。

$$P_{\text{aev}}(\rho_f)=-781.58\rho_f^2+118.12\rho_f+35.06 \quad (1)$$

$$P_{\text{aev}}(l_f)=-0.014l_f^2+0.546l_f+36.03 \quad (2)$$

2.4.2 纤维参数与毛细管负压 P_{aev} 的关系

公式(1),(2)能够分别反映纤维体积率和纤维长度与混凝土内部早期毛细管负压 P_{aev} 值的物理变化规律,有一定的科学指导作用,但工程中若纤维长度或纤维体积率改变,公式(1),(2)便不再适用,因此具有很大的局限性。实际工程中纤维体积率和纤维长度是同时存在的变量,需要建立一个综合考虑这 2 个参数的系统公式,为工程应用以及学术研究提供可靠的指导。本文将纤维体积率 ρ_f 和纤维长度 l_f 的乘积设为参数 G ,与其对应的 P_{aev} 记为 $P_{\text{aev},G}$,计算结果见表 4,不同纤维参数 G 与毛细管负压 P_{aev} 的关系见图 8。

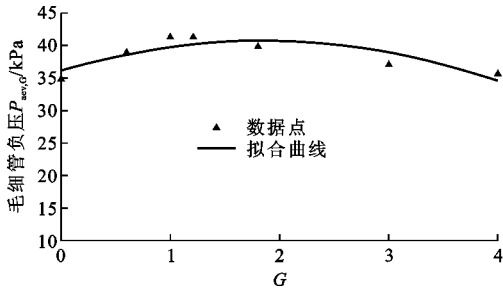
表 4 纤维参数 G 与毛细管负压 $P_{\text{aev},G}$
Tab. 4 Fiber Parameter G and Negative Capillary

Pressure $P_{\text{aev},G}$

纤维体积率/%	纤维长度/mm	参数 G	$P_{\text{aev},G}$ /kPa
0.000	0	0.00	34.8
0.033	18	0.60	38.9
0.067	18	1.21	41.3
0.100	18	1.80	39.8
0.133	18	3.00	37.0
0.900	10	1.00	41.3
0.900	40	4.00	35.6

从图 8 中可以看出,毛细管负压的 $P_{\text{aev},G}$ 值与参数 G 亦具有二次函数关系,同样采用二次多项式对数据进行拟合,拟合函数表达式见式(3),判定系数 $R^2=0.73$,计算得到参数 G 的最优值为 1.85,即 $\rho_f l_f=1.85$ 时,聚丙烯纤维混凝土抵抗早期局部开裂的能力最强。

$$P_{\text{aev},G}=-1.34G^2+4.96G+36.10 \quad G\geqslant 0 \quad (3)$$

图8 纤维参数 G 与毛细管负压 $P_{\text{ave},G}$ 拟合曲线Fig. 8 Fitting Curve of Fiber Parameter G and Negative Capillary Pressure $P_{\text{ave},G}$

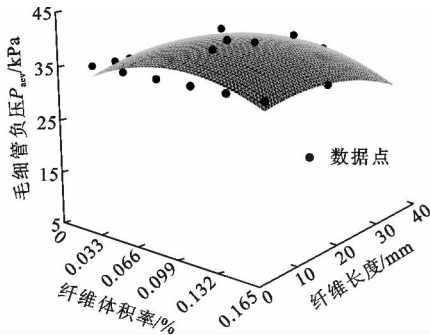
参数 G 综合考虑了纤维体积率和纤维长度 2 个因素,式(3)能够较好地解决工程中的应用技术问题,但通过式(3)只能确定纤维体积率和纤维长度乘积的最优值,无法同时确定二者的最优值,存在一定的缺陷,仍需进一步探索。

对表 3 中的数据进行非线性曲面拟合,拟合结果见图 9,拟合的非线性曲面函数表达式见式(4),判定系数 $R^2=0.58$ 。对式(4)进行求极值计算可同时得到纤维体积率和纤维长度的最优值分别为 0.075% 和 19.25 mm,此时混凝土内部毛细管负压的 P_{ave} 值最大达到 41.06 kPa,聚丙烯纤维混凝土抵抗早期局部开裂的能力最强。

$$P_{\text{ave}} = P(-17.72\rho_f^2 - 1.99 \times 10^{-4} l_f^2 + 3.02\rho_f + 8.94 \times 10^{-3} l_f + 1.71 \times 10^{-2} \rho_f l_f + 1) \quad (4)$$

$\rho_f > 0; l_f > 0$

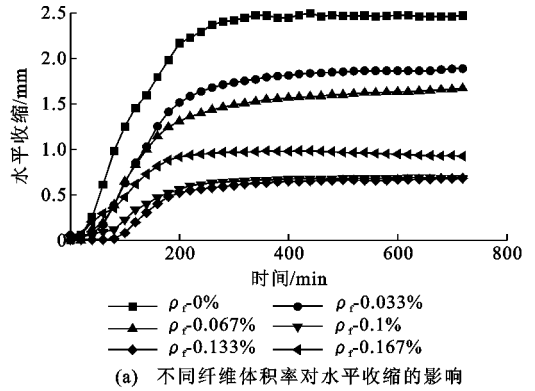
式中: P 为素混凝土毛细管负压的 P_{ave} 值,拟合值为 32.85 kPa。

图9 纤维各参数与毛细管负压 P_{ave} 非线性曲面拟合Fig. 9 Nonlinear Surface Fitting of Fiber Parameters and Negative Capillary Pressure P_{ave}

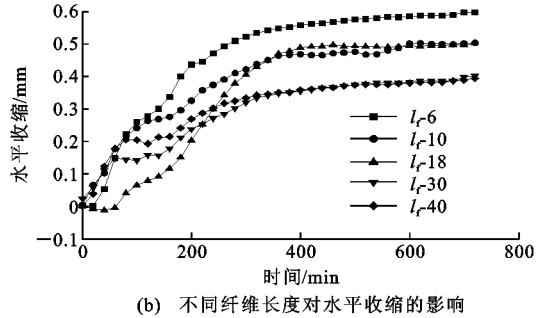
2.5 纤维对混凝土早期水平收缩的影响分析

不同纤维体积率和纤维长度对混凝土早期水平收缩的影响分别见图 10(a) 和 10(b)。

从图 10(a) 可以看出: 纤维掺入混凝土时混凝土早期水平收缩变形的发展速率及最大值明显低于



(a) 不同纤维体积率对水平收缩的影响



(b) 不同纤维长度对水平收缩的影响

图 10 不同纤维参数混凝土早期水平收缩

Fig. 10 Early Horizontal Shrinkage of Concrete with Different Fiber Parameters

素混凝土,随着纤维体积率从 0.033% 增加到 0.133%,混凝土的早期水平收缩速率越来越慢,且水平收缩的最大值越来越小,尤其当纤维体积率为 0.1% 和 0.133% 时,混凝土早期水平收缩的最大值为 0.68 mm,明显低于素混凝土的水平收缩最大值 2.48 mm,水平收缩降低了 72.6%;当纤维体积率超过 0.133% 时,纤维在搅拌过程中容易结团,难以在混凝土内部均匀分布,导致其早期水平收缩发展速率变快,且水平收缩最大值增大到 0.92 mm。同时从图 10(b) 可以看出,在纤维体积率、纤维直径一定时,随着纤维长度从 6 mm 增加到 40 mm,其混凝土的早期水平收缩速率越来越慢,水平收缩的最大值从 0.79 mm 减小到 0.39 mm。

综上所述,当纤维体积率为 0.1%~0.133%,纤维长度为 30~40 mm 时,纤维能够均匀地分散在混凝土中,此时混凝土早期的水平收缩变形最小,聚丙烯纤维对混凝土早期的水平收缩抑制效果最好。

3 结 语

(1) 随着纤维体积率增加,纤维在混凝土内部形成三维网状结构,提高了混凝土早期的抗裂强度,并有效地抑制了混凝土早期的水平收缩变形。

(2) 纤维体积率和纤维直径一定,纤维长度为

10~30 mm 时,纤维与混凝土之间黏结良好,混凝土早期局部开裂及水平收缩变形得到有效的抑制。

(3)根据综合考虑纤维体积率和纤维长度与 P_{aev} 关系的拟合公式,计算求得纤维体积率和纤维长度的最优值分别为 0.075% 和 19.25 mm。

(4)纤维参数的最佳组合建议为,纤维体积率取 0.1%,纤维长度取 18 mm,此时纤维混凝土早期毛细管负压的 P_{aev} 值达到 41.1 kPa,抵抗局部开裂的能力最强,同时早期水平收缩变形得到较好的抑制,水平收缩最大值相比素混凝土降低 72.6%。

参考文献:

References:

- [1] 杨碧成. 纤维混凝土早期塑性开裂试验及其阻裂机理研究[D]. 大连:大连理工大学,2017.
YANG Bi-cheng. Experimental Study and Mechanism of Cracking Resistance Research on the Early Plastic Cracking of Fiber Reinforced Concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2017.
- [2] 冯浩. 超高性能混凝土早期塑性收缩开裂的研究[D]. 长沙:湖南大学,2014.
FENG Hao. Study on the Early Stage Plastic Shrinkage and Cracking Performance of Ultra High Performance Concrete[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [3] SLOWIK V, SCHMIDT M, KASSLER D, et al. Capillary Pressure Monitoring in Plastic Concrete for Controlling Early-age Shrinkage Cracking[J]. Transportation Research Record, 2014, 2441(1): 1-5.
- [4] COMBRINCK R, BOSHOFF W P. Typical Plastic Shrinkage Cracking Behaviour of Concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 2013, 65(8): 486-493.
- [5] EREN O, MARAR K. Effect of Steel Fibers on Plastic Shrinkage Cracking of Normal and High Strength Concretes[J]. Materials Research, 2010, 13(2): 135-141.
- [6] SLOWIK V, SCHMIDT M, FRITZSCH R. Capillary Pressure in Fresh Cement-based Materials and Identification of the Air Entry Value[J]. Cement & Concrete Composites, 2008, 30(7): 557-565.
- [7] COMBRINCK R, STEYL L, BOSHOFF W P. Interaction Between Settlement and Shrinkage Cracking in Plastic Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 185(10): 1-11.
- [8] GUPTA R, BANTHIA N. Correlating Plastic Shrinkage Cracking Potential of Fiber Reinforced Cement Composites with Its Early-age Constitutive Response in Tension[J]. Materials and Structures, 2016, 49(4): 1499-1509.
- [9] STEYL L. Plastic Cracking of Concrete and the Effect of Depth[D]. Stellenbosch: Stellenbosch University, 2016.
- [10] 杜伟良. 高延性混凝土早期收缩性能及收缩模型研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2016.
DU Wei-liang. Experiment and Modeling on Early Shrinkage of High Ductile Fiber Reinforced Concrete [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.
- [11] PILLAR N M P, REPETTE W L. The Effect of Fibers on the Loss of Water by Evaporation and Shrinkage of Concrete[J]. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 2015, 8(1): 8-13.
- [12] LEEMANN A, NYGAARD P, LURA P. Impact of Admixtures on the Plastic Shrinkage Cracking of Self-compacting Concrete[J]. Cement & Concrete Composites, 2014, 46: 1-7.
- [13] QIN H G, FEI Z H, GUO W, et al. The Effects of Water-reducer on Early-age Plastic Shrinkage of Concrete[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 174-177: 1113-1118.
- [14] LIN S, HUANG R. Effect of Viscosity Modifying Agent on Plastic Shrinkage Cracking of Cementitious Composites[J]. Materials and Structures, 2010, 43(5): 651-664.
- [15] WITTMANN F H. On the Action of Capillary Pressure in Fresh Concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6(1): 49-56.
- [16] 钱觉时, 徐姗姗, 李美利, 等. 混凝土电阻率测量方法与应用[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2010, 29(1): 37-42.
QIAN Jue-shi, XU Shan-shan, LI Mei-li, et al. The Measurement and Application of Resistivity for Concrete[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2010, 29(1): 37-42.
- [17] 洪天从, 金南国, 傅兴有. 电阻率法研究混凝土早期微观性能[J]. 低温建筑技术, 2012(5): 1-2.
HONG Tian-cong, JIN Nan-guo, FU Xing-you. Study on the Early-age Micro-properties of Concrete Using Electrical Resistivity Method[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2012(5): 1-2.
- [18] 张建亮, 田倩, 王育江, 等. 水泥基材料毛细管负压的测试方法研究[J]. 混凝土, 2016(12): 44-47.
ZHANG Jian-liang, TIAN Qian, WANG Yu-jiang, et al. Study on Testing Methods of Capillary Depression of Cement-based Materials[J]. Concrete, 2016(12): 44-47.